

|         |  |
|---------|--|
| 氏名      | 高橋 雅裕  |
| 授与した学位  | 博士   |
| 専攻分野の名称 | 理学   |
| 学位授与番号  | 博甲第4123号   |
| 学位授与の日付 | 平成22年 3月25日  |
| 学位授与の要件 | 自然科学研究科 先端基礎科学専攻<br>(学位規則第5条第1項該当)   |
| 学位論文の題目 | Theoretical Study for Ground State Properties and Excitation Spectra of Bose-Einstein Condensates<br>(Bose-Einstein 凝縮体の基底状態及び励起状態に関する理論的研究) |
| 論文審査委員  | 教授 町田一成 教授 大嶋孝吉 教授 横谷尚睦 准教授 市岡優典   |

### 学位論文内容の要旨

本研究では、極低温原子気体で実現されている Bose-Einstein 凝縮 (BEC) における理論的な研究により、長距離かつ異方的な相互作用である双極子相互作用の大きな系における特異な基底状態を明らかにし、更に、内部自由度を持つ系においては、低エネルギー励起スペクトルの解析を用いて量子渦状態の安定性を明らかにした。

前者は、超微細スピン  $F$  の大きな系を想定し、長距離かつ異方的な相互作用である双極子相互作用を取り入れた。一般に平均場理論の範囲で、内部自由度  $F$  を持つ系では  $(2F+1)$  個の方程式を同時に解く必要があるが、古典スピン近似を導入しモデルハミルトニアンを導くことで、この問題を回避した。この近似では、スピンを古典的な単位ベクトルに置き換えてやることで、密度とスピンの角度を定義する合計 3 つの秩序パラメーターで系を記述することができる。得られた状態は、スピンの構造により密度構造が変化を受ける非常に興味深いもので、今後の強い双極子モーメントを持つ系において実験的な検証が望まれる。

後者は、超微細スピンの小さなもの  $F=1$  と  $2$  に注目し、双極子相互作用を無視した上で、特定の量子渦状態の低励起スペクトルを計算し、系の安定性を議論した。ここでは、コアレス量子渦と呼ばれる、各成分が渦度を  $0, 1, 2$  と持つ様な状態を想定した。この量子渦状態は、スピンの偏極した状態から連続的なスピンの回転によって得られるもので、外部回転下では、強磁性領域において基底状態であることが確かめられている。一方、実験的には、反強磁性領域等の他のスピン間相互作用領域において、コアレス量子渦状態が実現されており、これらの系の量子状態の安定性について、励起スペクトルの観点から調べることは、実験へのフィードバックも与えることができるため、非常に重要である。特に自発的に散逸無しで崩壊する動的不安定性に着目し研究を行い、結果としては、強磁性領域でコアレス量子渦状態は安定に存在し、他の状態では動的に多くのパラメーター領域で不安定となることが分かった。また、コアレス量子渦の各成分の粒子数比を変化させ、励起スペクトルを計算することで、動的不安定性の発現メカニズムを明らかにした。

今後は、これらの研究成果を統合し、発展させることで、近年実現が期待される異種核分子気体 BEC の基底状態及び渦状態の安定性についての研究を行うことが可能となるだろう。本研究は、それらの研究に先駆けた重要な研究であると言える。

## 論文審査結果の要旨

本論文において冷却中性原子気体のボーズアインシュタイン凝縮(BEC)に関して以下の2つの課題を研究した。

- 1) BEC原子が内部自由度をもっているスピナーBECについてhyperfine状態FがF=1の場合について渦芯なしの位相欠陥の動的不安定性をGross-Pitaevskii方程式とBogoliubov-de Gennes方程式を自己無道着に解くことによって明らかにした。系の相互作用が強磁性的な場合は不安定モードは主として渦度2を担っている成分が渦度1に分解するモードが固有値に虚数部をもつこととして発現することを見いだした。相互作用が反強磁性的な場合には上のモードに加えてこの相互作用に特有の相分離型のモードが動的に不安定になることを明らかにした。
- 2) hyperfine状態Fが大きい極限についての研究を行った。これは1) の場合のF=1が小さい極限であるので、この研究によってFの大きさが任意の場合のBECの一般的な性質を推測することを可能にするものである。高橋氏は独自にこのFが大きい極限の系に提案できるモデルを考案してこのモデルを数値解析を交えて考察した。その結果、トラップ形状に依存したいくつかのこれまでに報告されていない粒子密度とスピン構造が結合した織り目構造を発見した。

以上の理論的研究はこの分野に新たな知見を加えるものであり、博士論文に値するものと判定した。